干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

1961—2018年内蒙古6级及以上大风日数时空变化特征

邢丽珠[1,2]，张方敏[1,2]，黄 进[1,2]，李云鹏[3]

（1. 南京信息工程大学应用气象学院，气象灾害预报预警与评估协同创新中心，江苏 南京 210044；
2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室，江苏 南京 210044；3. 内蒙古自治区生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051）

摘 要：研究大风日数变化对区域气候变化、防灾减灾和风能开发具有重要意义。基于1961—2018年内蒙古及周边地区85个气象观测站的大风资料，采用统计方法对内蒙古地区大风日数时空分布特征进行分析。结果表明：(1) 58 a来，内蒙古大风日数总体呈显著减少趋势，气候倾向率为−16.52 d·(10a)$^{-1}$。各季节中春季大风日数最多，占全年大风日数的44.30%，且减少最显著[−6.24 d·(10a)$^{-1}$]；各级大风中6级大风日数最多，占总大风日数的80.93%，且减少最显著[−11.99 d·(10a)$^{-1}$]。(2) 内蒙古地区大风日数空间分布呈中部多、东北西南少的格局。大风日数发生较多的地区分布在锡林郭勒盟、乌兰察布市与赤峰市，较少的地区分布在鄂尔多斯市和呼和浩特市。(3) 6级和7级大风日数多集中在中部市/盟，8级及以上大风日数分布在西部与东部市/盟，各市/盟均表现为减少趋势，乌兰察布市气候倾向率最大，为−5.49 d·(10a)$^{-1}$，呼和浩特市最小，仅−0.01 d·(10a)$^{-1}$。

关 键 词：大风日数；时空分布；气候倾向率；内蒙古
文章编号：

全球气候变化背景下，关于风速变化的研究逐步得到重视[1]。近地表风速在一定程度上控制着地表与低层大气之间水、能量和动量的传递，是影响环境和气候变化的一个重要气象因子[2]，研究风速尤其是大风的长期变化，对于地表能量平衡、水循环、霾和沙尘暴的发生以及风能资源的评估具有重要意义[1,3-5]。

已有研究表明，在过去30~50 a间全球热带和中纬度地区普遍存在风速下降趋势，如美国[6]、澳大利亚[7]、葡萄牙、西班牙[8]和德国[9]等。国内学者研究也表明中国大部分地区风速呈现下降趋势[10-11]，Jiang等[12]发现1956—2004年平均风速在中国大范围内呈下降趋势，并且风速较大的地区大风日数减少幅度大。同时，研究发现平均风速的减小可能是由于大风风速的下降造成[13]，而我国大风日数整体呈现减少趋势[14]，但是区域特征显著。比如，俞海洋等[15]分析得到1984—2013年河北省大风日数大幅减少，变化达−42.40 d·(10a)$^{-1}$，春季大风日数最多且减幅最大；张占峰等[16]指出1971—2010年柴达木盆地大风日数变化幅度为−5.80 d·(10a)$^{-1}$，春季大风日数最多且风速较大，占全年大风日数的44.2%；高荣等[17]指出1971—2017年通辽气象站大风日数四季均呈明显的减少趋势，大风日数变化为−2.17 d·(10a)$^{-1}$；杨晓玲等[18]发现1971—2010年河西走廊东部大风日数减少速率为−10.77 d·(10a)$^{-1}$，春季大风日数最多，但夏季减幅最大。

内蒙古自治区位于我国北部，地域辽阔，东西跨度大，界于37°24′~53°23′N，97°12′~126°04′E之间，总面积1.183×10^7 km^2。由半湿润到半干旱、干旱气候，年平均气温0~8 ℃，年总降水量50~450 mm。地势由东北向西南斜伸呈狭长形，东部以温带牧场为特色，由东向西逐渐过渡为荒漠，西部沙漠广布。牧区的大风可吹散畜群，威胁畜牧业生产。大风还容易造成土壤风蚀和沙化，破坏生态环境，是

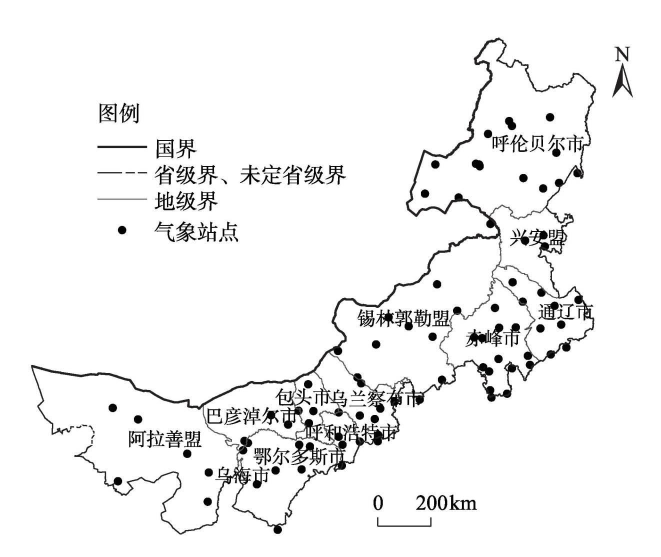
收稿日期：2020-07-03； **修订日期：**2020-12-17
基金项目：科技部重大研发计划(2018YFC1506606)；江苏省优秀青年基金项目(BK20170102)
作者简介：邢丽珠(1995-)，女，硕士生，主要从事应用气象研究. E-mail: 864512419@qq.com
通讯作者：张方敏(1983-)，女，博士，教授，主要从事应用气象与生态遥感研究. E-mail: fmin.zhang@nuist.edu.cn

沙尘天气的主要诱因[5]。同时大风还影响农业生产、交通运输、能源发电和人民生活[19]。目前，内蒙古地区多是以风速变化研究居多[19-21]，而对大风日数尤其是各等级大风日数研究较少。鉴于此，本文利用1961—2018年内蒙古及周边地区85个地面气象站的大风风速观测资料，分析内蒙古大风日数时空变化分布特征，旨在为该地区防灾减灾、合理利用风能资源以及改善生态环境提供科学指导。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文所用大风数据来源于中国地面气候资料数据集(http://data.cma.cn/)，所有数据都经过标准化订正处理，时间长度为58 a(1961—2018年)。为了研究内蒙古的大风特征，剔除存在缺陷以及时间覆盖不够的测站，保证大风资料的均一性，最终选取包括内蒙古及周边地区85个气象观测站点(图1)。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为蒙S(2017)029号的标准地图制作，底图无修改。下同。

图1 研究区及气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of the meteorological stations

1.2 研究方法

大风采用天气预报业务规范[15]及中国气象局提出的国标GB/T 28591—2012风力等级[22]，将10 min平均风速达到6级或以上(≥10.8 m·s^{-1})称为大风[23]，若一天有大风出现一次或者多次，记为一个大风日。季节划分参照任国玉等[11]，即上年12月—当年2月为冬季、3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季。为表述方便，本文分别将1961—1969年、1970—1979年、1980—1989年、1990—1999年、2000—2009年和2010—2018年表述为1960s、1970s、1980s、1990s、2000s和2010s。

大风日数的长期变化用一元线性回归方程表示，采用气候倾向率[24]描述气候要素变化趋势及幅度；采用反距离权重(Inverse distance weighted)插值法[15]分析内蒙古大风的空间变化特征；利用Mann-Kendall方法[24]对内蒙古大风日数变化趋势进行显著性检验，若标准化统计检验值Z>0，表示大风日数随着时间呈现增加趋势，反之为减少。当$|Z|>Z_{(1-\alpha/2)}$时，认为大风日数存在显著趋势。当取显著性水平α=5%时，对应的$Z_{(1-\alpha/2)}$为1.96。

2 结果与分析

2.1 大风日数时间变化趋势

2.1.1 全年及四季大风日数年际变化 1961—2018年内蒙古年大风日数表现为先增加后减少，总体为减少趋势(图2)。58 a大风日数均值为47.17 d，气候倾向率为−16.52 d·(10a)$^{-1}$(P<0.05)。其变化大体可以分为3个阶段：1961—1972年大风日数呈现增加趋势，从1961年的73 d增加到1972年的127 d，达到58 a中的峰值；1973—1990年大风日数呈现显著减少趋势，气候倾向率为−44.35 d·(10a)$^{-1}$(P<0.05)，下降到20 d左右；1991—2018年大风日数变化基本不明显，在10~29 d之间波动。总的来说，1960s和1970s是大风多发年代，占到58 a总大风日数的60%以上，1990s以后较少发生，21世纪以来大风日数占58 a总大风日数的13%。

各季节大风日数的变化与年大风日数表现一

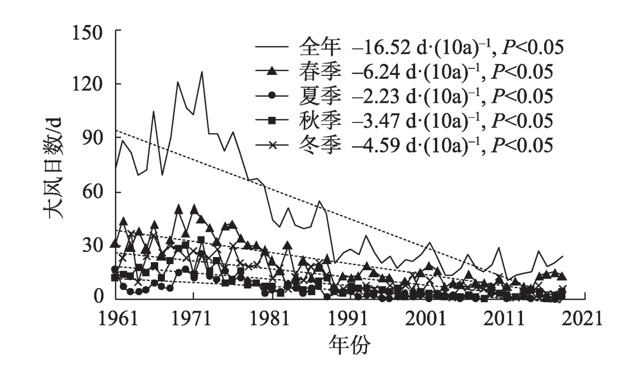


图2 1961—2018年内蒙古大风日数的年际变化

Fig. 2 Interannual variations of high wind days in Inner Mongolia from 1961 to 2018

样，均为先增加后减少，总体为减小趋势(图2)。其中，春季年均大风日数最多，达到20.90 d，占全年大风日数的44.30%，其中最多的年份在1969年和1971年，达到50 d，且减幅最明显，气候倾向率为−6.24 d·$(10a)^{-1}$($P<0.05$)，从1970s到1980s下降最大，1990s及以后变化不显著；其次是冬季，年均大风日数12.97 d，占全年大风日数的27.49%，气候倾向率为−4.59 d·$(10a)^{-1}$($P<0.05$)，大风日数最多的年份在1963年(36 d)，到1980s迅速下降到4.6 d，1990年以后下降缓慢；秋季年均大风日数为8.19 d，占全年大风日数的17.36%，气候倾向率为−3.47 d·$(10a)^{-1}$($P<0.05$)，大风日数最多的年份在1972年(33 d)；夏季减幅最小，大风日数在各季节中最少(5.12 d)，占全年大风日数的10.86%，气候倾向率为−2.23 d·$(10a)^{-1}$($P<0.05$)，大风日数最多年份在1972年(25 d)。从变化程度看，各个季节从1970s到1990s初下降最显著，在1990s后变化不显著。

2.1.2 各级别大风日数年际变化 从内蒙古1961—2018年各级别大风日数的年际变化(图3、表1)可以看出，6级、7级和8级大风日数随时间变化呈明显的减少趋势，9级、10级大风只在个别年份出现，近年来出现较少。其中，6级大风出现频率最高，共出现2216 d，年均大风日数达38.21 d，占总大风日数的80.91%，其中1970s最多，年均达70.7 d；气候倾向率为−11.99 d·$(10a)^{-1}$($P<0.05$)，减少趋势最为明显。其次，7级大风共出现465 d，年均大风日数为8.02 d，占总大风日数的17.00%，其中1970s最多，年均达18.9 d，1990s最少(共6 d)；气候倾向率为−3.95 d·$(10a)^{-1}$($P<0.05$)，减幅较大。8级大风共出现53 d，年均不足1 d，占总大风日数的1.94%，21世纪以来

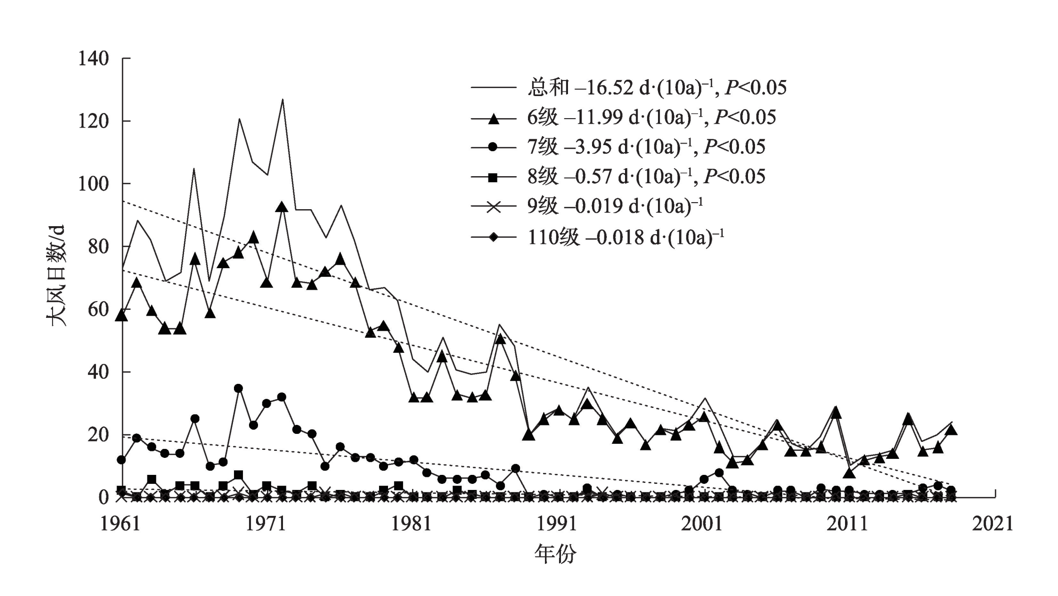


图3 1961—2018年内蒙古各级大风日数的年际变化

Fig. 3 Interannual variations of high wind days at all levels in Inner Mongolia from 1961 to 2018

表1 1961—2018年内蒙古各级大风日数年代际变化

Tab. 1 Interdecadal variations of high wind days at all levels in Inner Mongolia from 1961 to 2018

年代	6级	7级	8级	9级	10级	总数	占比/%
1960s	583	158	28	1	1	769	28.11
1970s	707	189	15	1	0	912	33.33
1980s	365	69	7	0	0	441	16.12
1990s	235	6	2	1	0	244	8.92
2000s	174	26	0	0	0	200	7.31
2010s	152	17	1	0	0	170	6.21
1961—2018年	2216	465	53	3	1	2736	100
占比/%	80.91	17.00	1.94	0.11	0.04	100	−

仅出现3 d，气候倾向率为−0.57 d·(10a)$^{-1}$(P<0.05)。9级和10级大风总和占总大风日数的0.15%，9级大风仅出现3 d，分别发生在1969、1975年和1994年；10级大风仅有1 d，发生在1961年。总的来说，1960s和1970s是大风多发的年代，占总大风日数的61.47%，21世纪以来大风明显减少，且极端大风较少出现。

2.1.3 各级别大风日数逐月变化 内蒙古各级别大风日数逐月变化如图4所示，总大风日数峰值在4月，为481 d(年均8.29 d)，谷值在7月，为60 d(年均1.03 d)。6级和7级大风日数与总大风日数具有相同的变化趋势，先下降、后上升、再下降、最后上升；2月达到极小值(6级173 d，7级32 d)，4月达到峰值(6级369 d，7级87 d)，7月达到谷值(6级54 d，7级6 d)，12月达到极大值(6级228 d，7级46 d)。8级大风日数呈现先上升、后下降、再上升、最后下降的变化趋势；4月达到峰值(22 d)，6—9月为0 d，11月达到极大值(3 d)，12月达到极小值(1 d)。9级和10级大风日数出现较少，峰值出现在4月，9级大风2 d，10级1 d，其余无明显变化特征。

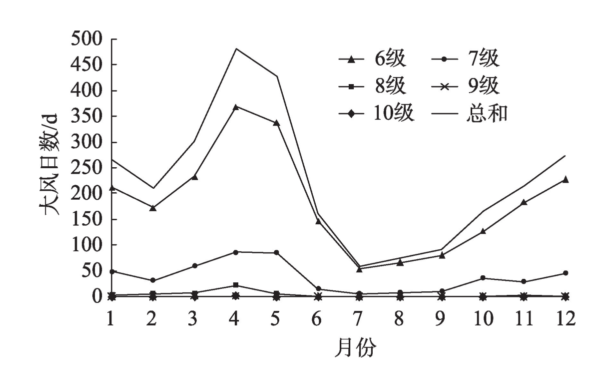


图4 1961—2018年内蒙古各级大风日数逐月变化

Fig. 4 Monthly variations of high wind days at all levels in Inner Mongolia from 1961 to 2018

2.2 大风日数空间分布特征

2.2.1 全年及四季大风日数空间分布 1961—2018年内蒙古大风日数及其气候倾向率空间分布如图5所示，大风日数呈现“中部多、东北西南少”的空间分布。内蒙古中部是大风易发生地区，尤其是锡林郭勒盟与乌兰察布市交界处、中西部的包头市北部，与中东部的赤峰市北部，其中赤峰市北部是大风日数发生的最高地区，大风日数共为555 d，锡林郭勒盟西部、包头市北部等地区大风日数在270 d以上。内蒙古东北部和西部是大风发生极少的地

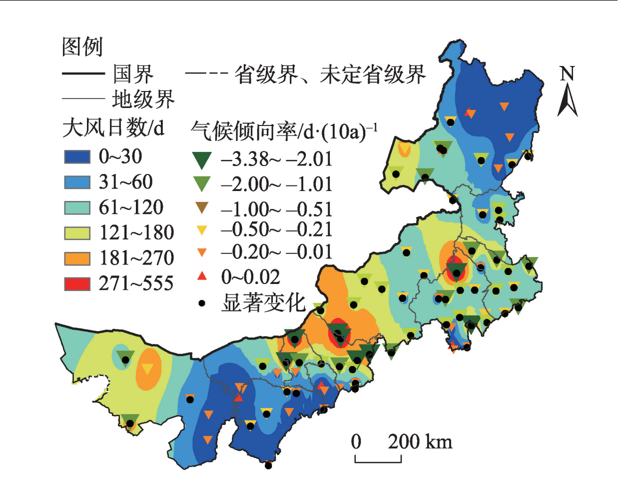


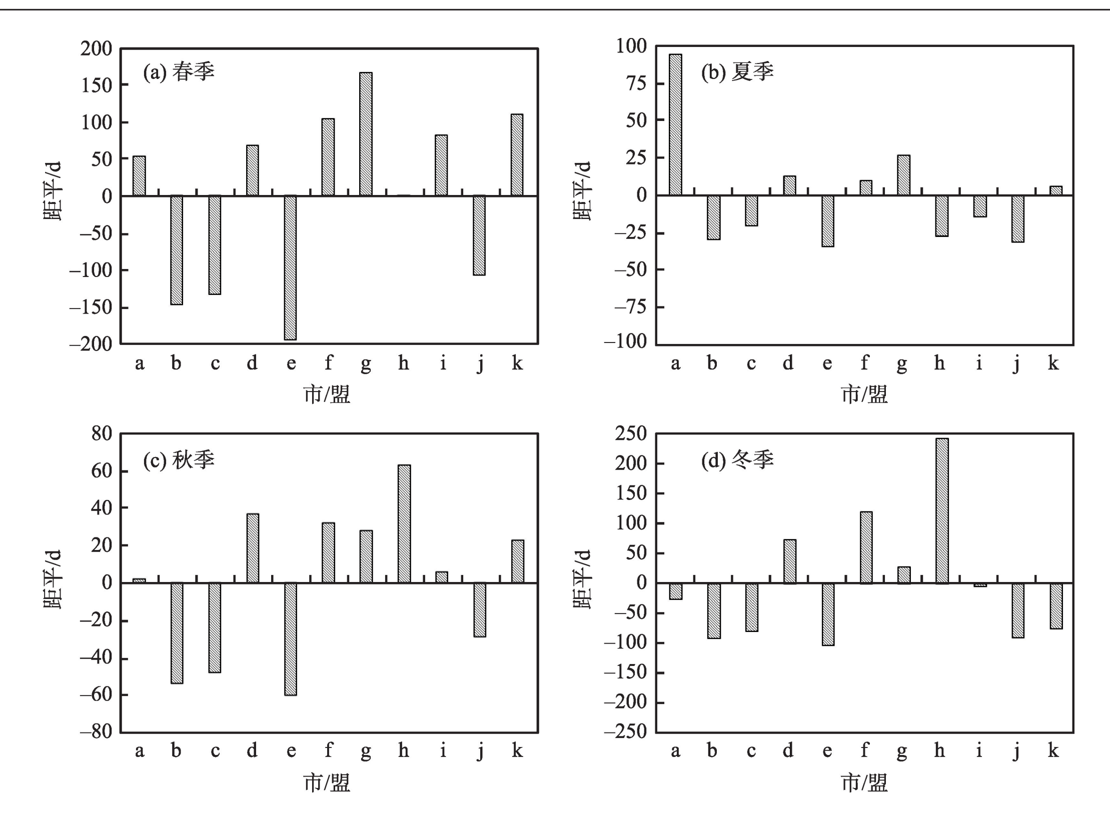
图5 1961—2018年内蒙古大风日数及倾向率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of high wind days and tendency rate in Inner Mongolia from 1961 to 2018

区，尤其是呼伦贝尔市根河和巴彦淖尔市磴口地区全年无大风发生。呼伦贝尔市北部、巴彦淖尔市南部以及鄂尔多斯市南部等地区大风日数均在10 d以下。总体来看，内蒙古一半以上地区大风日数在0~120 d，10%~20%地区在180 d以上。

内蒙古大风日数较多的中部地区减少速率明显大于大风日数较少的东北部和西南部地区，绝大部分站点(80个)大风日数呈减少趋势，其中62个站点通过了95%的显著性检验，减少最快的站点是位于内蒙古赤峰市北部的富河地区，气候倾向率达−3.38 d·(10a)$^{-1}$(P<0.05)，有极少数站点(3个)大风日数呈增加趋势，其中呼和浩特站增加最快，气候倾向率达0.02 d·(10a)$^{-1}$。

1961—2018年内蒙古各市/盟四季大风日数距平分布如图6所示(因乌海市无研究站点分布，故不参与统计)，从春季大风日数的距平分布来看(图6a)，内蒙古中部的乌兰察布市、锡林郭勒盟和东北部的呼伦贝尔市是春季大风易发生地区，距平在100 d以上，尤其是锡林郭勒盟，距平达166 d；西部的阿拉善盟、中部的包头市以及东部通辽市是春季大风较易发生地区，距平在0~100 d；巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、呼和浩特市和兴安盟为春季大风不易发生的地区，均表现为负距平，尤其是呼和浩特市，距平达−195 d。从夏季大风的距平分布来看(图6b)，内蒙古西部的阿拉善盟、中部的包头市、乌兰察布市和锡林郭勒盟以及东北部的呼伦贝尔市为较易发生地区，阿拉善盟距平达95 d，其次是锡林郭勒盟距平27 d，巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、呼和浩特



注：a为阿拉善；b为巴彦淖尔；c为鄂尔多斯；d为包头；e为呼和浩特；f为乌兰察布；g为锡林郭勒；h为赤峰；i为通辽；j为兴安；k为呼伦贝尔。下同。

图6 1961—2018年内蒙古各市/盟四季大风日数距平分布

Fig. 6 Distributions of high wind days anomalies in all seasons in Inner Mongolia from 1961 to 2018

市、赤峰市和兴安盟表现为负距平，呼和浩特市距平达-34 d，是各市/盟中最不易发生夏季大风的地区。从秋季大风的距平分布来看(图6c)，内蒙古中部的包头市、乌兰察布市、锡林郭勒盟和赤峰市以及东北部的呼伦贝尔市为秋季大风较易发生地区，距平在0~100 d，赤峰市距平达63 d，巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、呼和浩特市和兴安盟表现为负距平，呼和浩特市距平-60 d。从冬季大风的距平分布来看(图6d)，正距平完全集中在内蒙古中部地区，其中赤峰市距平为241 d，乌兰察布市距平为119 d，锡林郭勒盟和包头市距平在0~100 d，其余市/盟均为负距平，依然是呼和浩特市距平最大，为-102 d。总体来说，春季、秋季和冬季大风较易发生地区集中在内蒙古中部地区，夏季大风较易发生地区位于内蒙古西部。

2.2.2 各级别大风日数空间分布 内蒙古各级别大风日数的距平分布如图7所示，从6级大风的距平分布来看(图7a)，中部的乌兰察布市、锡林郭勒盟和中东部的赤峰市是6级大风易发生地区，距平在200 d以上，尤其是赤峰市，距平达到250 d，其次是乌兰察布市，距平达到244 d，锡林郭勒盟距平为229 d；中部的包头市和西部的阿拉善盟是6级大风较易发生地区，距平在100~200 d，内蒙古东部的通辽市和呼伦贝尔市距平在0~100 d；西部的巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、中部的呼和浩特市和东部的兴安盟为6级大风不易发生的地区，均表现为负距平，尤其是呼和浩特市，距平达-340 d。从7级大风的距平分布来看(图7b)，内蒙古中部以及东部偏南地区为较易发生地区，通辽市距平达33 d，其次是赤峰市距平29 d；西部的巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、中部的呼和浩特市和东部兴安盟表现为负距平，呼和浩特市距平达-48 d，是各市/盟中最不易发生7级大风的地区。从8级大风的距平分布来看(图7c)，内蒙古80%的地区不易发生8级大风，相对来说东部的通辽市较易发生8级大风，距平达5 d以上，其次为内蒙古中部的包头市、西部的阿拉善盟以及东北部的呼伦贝尔市，距平在0~5 d；内蒙古有7市/盟为负距平，其中西部的巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、中部的呼和浩特市和锡林郭勒盟，距平为-3 d，无8级大风出现。从9级大风的距平分布来看(图7d)，只有内蒙

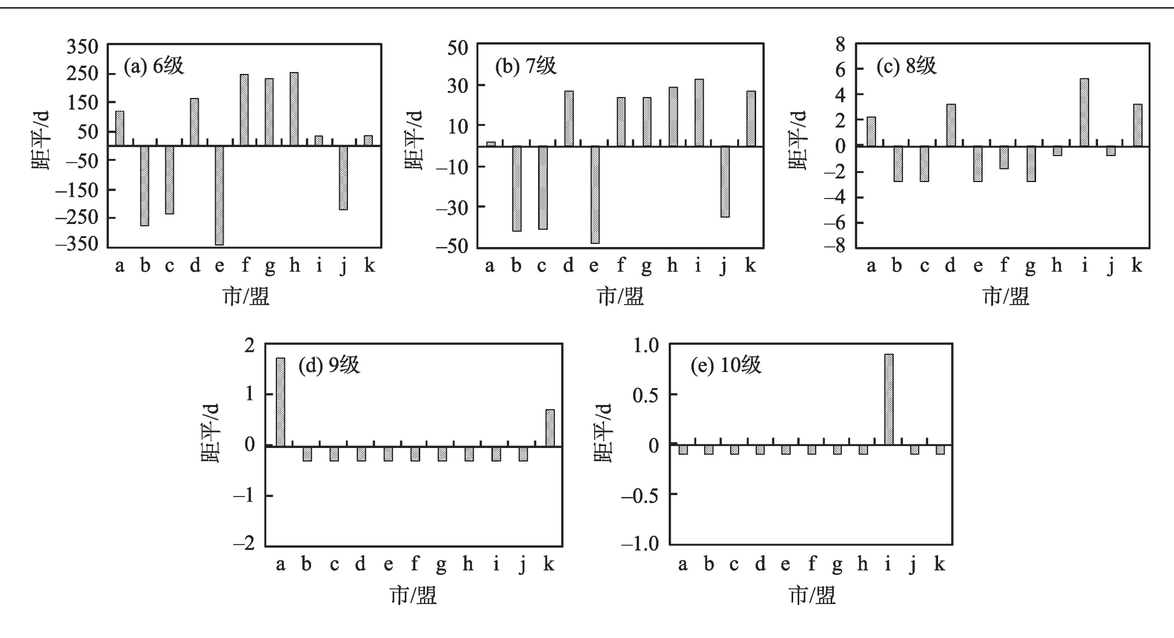


图7　1961—2018年内蒙古各市/盟各级别大风日数距平分布

Fig. 7　Distributions of high wind days anomalies of all levels in Inner Mongolia from 1961 to 2018

古西部的阿拉善盟与东北部的呼伦贝尔市为正距平，其余市/盟均为负距平。从10级大风的距平分布来看(图7e)，仅东部的通辽市为正距平，其余市/盟均为负距平，说明内蒙古西部与东部地区相比之下虽不易发生大风，但一旦发生就是级别较高的大风，更应注意大风带来的一系列问题，采取相关措施。

2.2.3　各市/盟大风日数变化趋势　内蒙古各市/盟58 a大风日数气候倾向率以及在1960s、1980s和2010s的大风日数分布如表2所示，气候倾向率大于−3.00 d·(10a)$^{-1}$的市盟有：乌兰察布市>赤峰市>通辽市>锡林郭勒盟>包头市，大部分位于内蒙古中部地区；气候倾向率小于−1.00 d·(10a)$^{-1}$的市盟有：呼和浩特市<鄂尔多斯市，位于内蒙古西南部。各市/盟中呼和浩特市在1960s、1980s和2010s大风日数没有明显变化，阿拉善盟在1980s无8级风出现，却在2015年出现1 d的8级大风，锡林郭勒盟在2010s的7级大风较1980s有所增加。其余各市/盟从1960s到2010s大风日数显著减少，尤其是6级大风日数。

3　结论与讨论

根据1961—2018年内蒙古及周边地区85个地面气象观测站数据，对内蒙古大风日数时空分布特

表2　内蒙古大风日数58 a气候倾向率及其在1960s、1980s和2010s变化

Tab. 2　Climate tendency rate of high wind days in 58 a and their changes in 1960s, 1980s and 2010s in Inner Mongolia

市/盟	气候倾向率 /d·(10a)$^{-1}$	1960s大风日数/d					1980s大风日数/d			2010s大风日数/d		
		6级	7级	8级	9级	10级	6级	7级	8级	6级	7级	8级
阿拉善	−2.95	115	13	4	0	0	71	10	0	30	2	1
巴彦淖尔	−2.99	18	2	0	0	0	12	2	0	0	0	0
鄂尔多斯	−0.96	36	1	0	0	0	11	0	0	9	0	0
包头	−3.25	157	34	2	0	0	50	4	1	19	0	0
呼和浩特	−0.01	1	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0
乌兰察布	−5.49	184	26	4	0	0	91	5	2	19	1	0
锡林郭勒	−3.38	156	23	0	0	0	73	1	10	53	8	0
赤峰	−4.48	146	37	7	0	0	143	23	0	15	1	0
通辽	−3.75	133	0	0	0	1	88	0	0	0	0	0
兴安	−1.13	41	4	2	0	0	18	3	0	2	0	0
呼伦贝尔	−2.86	11	25	2	1	0	8	8	0	3	6	0

征进行分析,得到以下结论:

(1) 1961—2018年内蒙古年均6级及以上大风日数为47.17 d,总体呈减少趋势,气候倾向率为−16.52 d·(10a)$^{-1}$,其中1970s到1980s减少最显著。各季节大风日数也呈减少趋势,春季大风日数最多,占全年总大风日数的44.30%。夏季大风日数最少,占全年总大风日数的10.86%。在各级大风中,6级、7级和8级大风日数随时间变化呈明显减少趋势,9级、10级大风只在个别年份出现,近年来出现较少,变化不明显。其中,6级大风日数最多,占比超过80%。各级大风日数逐月变化中,峰值在4月,谷值在7月。

(2) 内蒙古大风日数空间上呈现"中部多、东北西南少"的分布格局,中部地区是大风易发生地区,如锡林郭勒盟与乌兰察布市交界处、包头市北部与赤峰市北部,东北部和西南部是大风较少发生地区,如呼伦贝尔市,以及西南部阿拉善盟、巴彦淖尔市和鄂尔多斯市交界地带。大部分站点大风日数呈现显著减少趋势,中部地区减少速率明显大于东北部和西南部地区,极少数站点大风日数呈增加趋势。

(3) 各市/盟中春季大风日数最多的是锡林郭勒盟,距平达166 d,夏季大风日数最多的是阿拉善盟,距平达95 d,秋季和冬季大风日数最多的市/盟均是赤峰市,距平分别为63 d和241 d,各季节大风日数最多的市/盟是赤峰市,最少的是呼和浩特市。6级大风日数集中在中部和中东部,其中赤峰市最多,7级大风日数集中在中部和东部,通辽市最多,8级大风日数较少,最多的是通辽市,9级和10级大风日数极少,最多的市/盟分别是阿拉善盟和通辽市。各市/盟大风日数均为减少趋势,减少幅度最大的是乌兰察布市[−5.49 d·(10a)$^{-1}$],最小的是呼和浩特市[−0.01 d·(10a)$^{-1}$]。

本文研究了内蒙古地区长时间序列大风日数时空分布特征,发现内蒙古大风日数呈减少趋势,这与在其他地区的研究[13−14]有较好的一致性,但变化程度不同,内蒙古大风日数气候倾向率[−16.52 d·(10a)$^{-1}$]小于河北[−42.40 d·(10a)$^{-1}$][15],大于柴达木盆地[−5.80 d·(10a)$^{-1}$][16],这体现了区域的差异性。内蒙古大风日数1970s到1980s减少最显著,这主要是因为1980年后随着中国生态修复工程在内蒙古地区的开展[25],在一定程度上降低了大风的发生。

总体来说,本文通过对各级别大风日数时空演变的分析,丰富了目前此方面的研究,这不仅有助于了解沙尘、霾等极端现象的出现,也有助于风能资源的开发利用。但由于对大风日数的统计并不统一,比如有研究以瞬时风速达到或者超过17.0 m·s^{-1}为大风[16],一定程度上影响了各地大风的统计结果,因此,全方位系统开展大风日数时空变化研究,对于推进该领域的科学认识具有重要意义。

参考文献(References)

[1] 张晓龙, 沈冰, 黄领梅. 基于ITPCAS再分析资料中国近地面风速时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 1−9. [Zhang Xiaolong, Shen Bing, Huang Lingmei. Spatiotemporal variation of near surface wind speed over China based on ITPCAS reanalyzed dataset[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 1−9.]

[2] Pryor S C, Schoof J T, Barthelmie R J, et al. Winds of change: Projections of near-surface winds under climate change scenarios[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(11): L11702, doi: 10.1029/2006GL026000.

[3] 王楠, 游庆龙, 刘菊菊. 1979—2014年中国地面风速的长期变化趋势[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1531−1542. [Wang Nan, You Qinglong, Liu Juju. The long-term trend of surface wind speed in China from 1979 to 2014[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1531−1542.]

[4] 马爱华, 岳大鹏, 赵景波, 等. 近60 a来内蒙古极端降水时空变化及其影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 74−85. [Ma Aihua, Yue Dapeng, Zhao Jingbo, et al. Spatiotemporal variation and effect of extreme precipitation in Inner Mongolia in recent 60 years [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 74−85.]

[5] 李玲萍, 李岩瑛, 孙占峰, 等. 河西走廊东部沙尘暴特征及地面气象因素影响机制[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1457−1465. [Li Lingping, Li Yanying, Sun Zhanfeng, et al. Sandstorm and its affecting meteorological factors in east Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1457−1465.]

[6] Pryor S C, Barthelmie R J, Young D T, et al. Wind speed trends over the contiguous United States[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114: D14105, doi: 10.1029/2008JD011416.

[7] Mcvicar T R, Niel T G V, Li L T, et al. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975—2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L20403, doi: 10.1029/2008GL035627.

[8] Azorin-Molina C, Vicente-Serrano S M, Mcvucar T R, et al. Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961—2011[J]. Journal of Climate, 2014, 27(10): 3692−3712.

[9] Kaiser-Weiss A K, Kaspar F, Heene V, et al. Comparison of regional and global reanalysis near-surface winds with station observations over Germany[J]. Advances in Science and Research, 2015, 12(1): 187-198, doi: 10.5194/asr-12-187-2015.

[10] Xu M, Chang C P, Fu C B, et al. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969—2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111: D24111, doi: 10.1029/2006JD007337.

[11] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. [Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942-956.]

[12] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. Changes in wind speed over China during 1956—2004[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99(3): 421-430.

[13] 江滢, 罗勇, 赵宗慈, 等. 近50年中国风速变化及原因分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会2007年年会气候变化分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2007: 80-89. [Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. Analysis of wind speed variation and its causes in recent 50 years in China[C]//Chinese Meteorological Society. Proceedings of the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society on Climate Change. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2007: 80-89.]

[14] 孔锋, 李颖, 王一飞, 等. 1961—2016年中国近地表大风日数时空分异特征研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(31): 188-196. [Kong Feng, Li Ying, Wang Yifei, et al. Spatial and temporal variation characteristics of near-surface gale days in China from 1961 to 2016[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(31): 188-196.]

[15] 俞海洋, 李婷, 陈笑娟, 等. 河北省近30年大风时空分布及成灾特征分析[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 59-63. [Yu Haiyang, Li Ting, Chen Xiaojuan, et al. The spatio-temporal distribution and disaster characteristics analysis of the gale in Hebei Province for nearly 30 years[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 59-63.]

[16] 张占峰, 张焕平, 马小萍. 柴达木盆地平均风速与大风日数的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 90-94. [Zhang Zhanfeng Zhang Huanping, Ma Xiaoping. Change features of average wind speed and strong wind days in Chaidamu Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(10): 90-94.]

[17] 高荣, 尤莉, 白颖哲. 通辽气象站1971—2017年大风日数的变化特征[J]. 内蒙古气象, 2018(3): 18-21. [Gao Rong, You Li, Bai Yingzhe. The variations of the gale days in Tongliao station from 1971 to 2017[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2018(3): 18-21.]

[18] 杨晓玲, 周华, 杨梅, 等. 河西走廊东部大风日数时空分布及其对沙尘天气的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(16): 123-128. [Yang Xiaoling, Zhou Hua, Yang Mei, et al. Gale days in east of Hexi Corridor: Spatial-temporal distribution and effect on sand-dust weather[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(16): 123-128.]

[19] 王钦, 曾波, 邓力. 1981—2013年内蒙古地区风速的时空变化特征[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2015, 44(5): 674-679. [Wang Qin, Zeng Bo, Deng Li. Characteristics of spatial and temporal changes of wind speed during 1981—2013 in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2015, 44(5): 674-679.]

[20] 张宇. 1976—2017年内蒙古最大风速时空特征分析[J]. 内蒙古气象, 2019(4): 22-25. [Zhang Yu. Analysis of temporal-spatial variation characteristics of max-windspeed during 1976—2017 in Inner Mongolia[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2019(4): 22-25.]

[21] 邢丽珠, 张方敏, 黄进, 等. 1961—2018年内蒙古风速变化及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 162-168. [Xing Lizhu, Zhang Fangmin, Huang Jin, et al. Analysis of spatial and temporal change of wind velocity and its affecting factors in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(11): 162-168.]

[22] GB/T 28591—2012. 中华人民共和国国家标准: 风力等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. [GB/T 28591—2012. National Standard of the People's Republic of China: Wind scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.]

[23] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 第四版. 北京, 气象出版社, 2007: 249. [Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Principles and methods of synoptic meteorology[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 249.]

[24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第二版. 北京, 气象出版社, 2007: 36-63. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. 2nd ed. Beijiing: China Meteorological Press, 2007: 36-63.]

[25] 王瑾, 闫庆武, 谭学玲, 等. 内蒙古地区植被覆盖动态及驱动因素分析[J]. 林业资源管理, 2019(4): 159-167. [Wang Jin, Yan Qingwu, Tan Xueling, et al. Vegetation coverage dynamics and its driving factors in Inner Mongolia based on FVC information entropy[J]. Forest Resources Management, 2019(4): 159-167.]

Spatial and temporal changes of high wind days over category 6 and above in Inner Mongolia from 1961 to 2018

XING Lizhu[1,2], ZHANG Fangmin[1,2], HUANG Jin[1,2], LI Yunpeng[3]

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu 210044, Nanjing, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu 210044, Nanjing, China; 3. Ecology and Agrometeorology Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: Research on changes in strong wind days is important for regional climate change, disaster prevention and mitigation, and wind energy development. Therefore, the spatial and temporal distribution characteristics of strong wind days in Inner Mongolia, China were analyzed using statistical methods based on daily wind speed data of 85 meteorological stations in and around Inner Mongolia from 1961 to 2018. The results showed that: (1) Over the past 58 years, the number of strong wind days in Inner Mongolia decreased overall, and the climate tendency rate was -16.52 d·(10a)$^{-1}$. On a seasonal scale, the number of strong spring wind days was the largest, accounting for 44.30% of the year, the most significant decline [-6.24 d·(10a)$^{-1}$] of all seasons. On a wind level scale, strong wind days of level 6 were the most frequent, accounting for 80.93% of all strong wind days, the most significant decline [-11.99 d·(10a)$^{-1}$] of all levels. (2) The spatial distribution of strong wind days was large in the central part of Inner Mongolia and small in the northeastern and southwestern parts. Strong wind days occurred more frequently in Xilin Gol League, Ulanqab City, and Chifeng City but less frequently in Ordos City and Hohhot City. (3) Level 6 strong wind days were mainly concentrated in central cities, and level 8 (and higher) strong wind days were distributed in western and eastern cities. All cities showed a decreasing trend. Ulanqab City showed the highest climate trend rate of -5.49 d·(10a)$^{-1}$, and Hohhot City showed the lowest trend rate of -0.01 d·(10a)$^{-1}$.

Key words: high wind days; spatial and temporal distribution; climate tendency rate; Inner Mongolia